

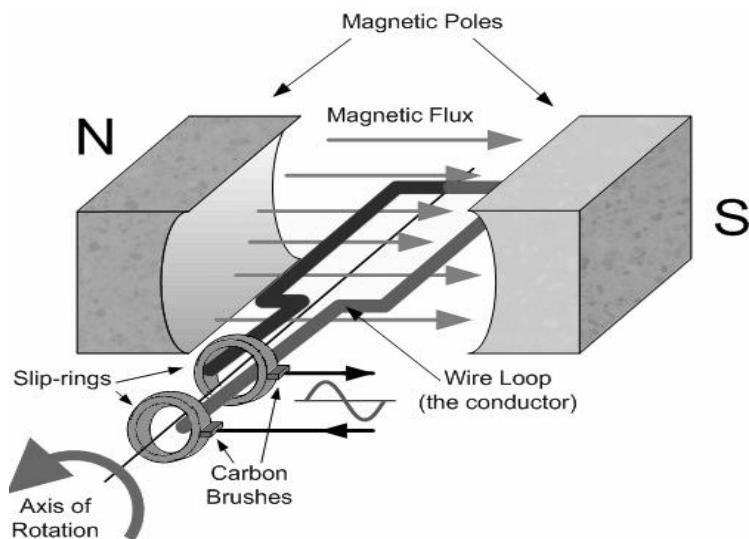
## BAB II

# GENERATOR DAN RELE DIFFERENSIAL

### 2.1 Generator

#### 2.1.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Generator sinkron bekerja dengan prinsip sama dengan generator arus searah, yaitu prinsip induksi elektromagnetik. Generator sinkron atau altenator yang kadang-kadang disebut generator arus bolak-balik (AC), digerakkan oleh turbin uap, hidro turbin (turbin air) dan turbin gas.

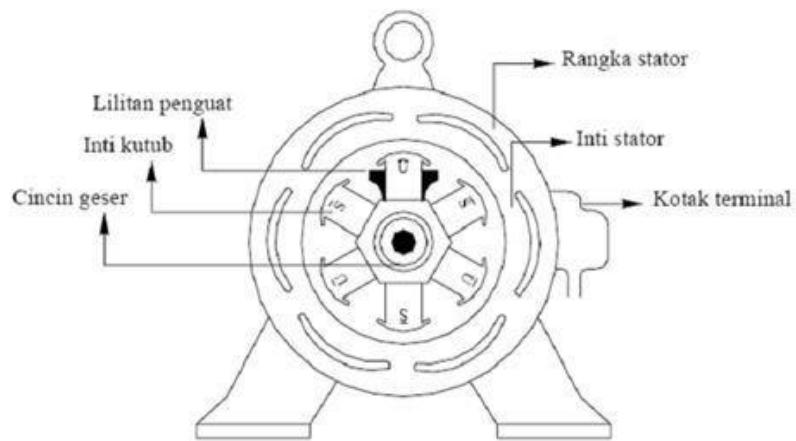


Gambar 2.1 Prinsip Dasar Generator

Pada gambar 2.1 diperlihatkan penghantar yang terdiri dari satu belitan yang berbentuk persegi panjang berputar pada porosnya dalam suatu medan magnet yang seragam. Kedua ujung dari belitan masing-masing dihubungkan pada cincin geser. Dua sikat karbon dihubungkan kedua cincin geser tersebut. Fungsi dari sikat ini adalah menyalurkan arus induksi dalam kumparan dan kemudian disalurkan kebeban. Kumparan yang berputar ini disebut rotor atau jangkar atau armature dan magnetnya sebagai medan magnet.

### 2.1.2 Konstruksi Generator Sinkron

Generator sinkron mempunyai konstruksi, yaitu kumparan jangkar disebut juga kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama-sama dengan kutub magnet diputar oleh tenaga mekanik.



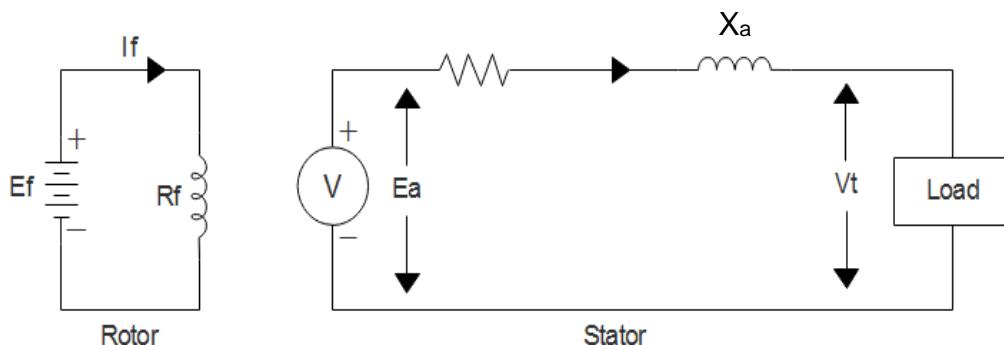
Gambar 2.2 Bagian Konstruksi Generator

Lilitan angker atau armature windings ditempatkan pada bagian tetap yang disebut stator. Lilitan angker didesain untuk pembangkitan tegangan tiga fasa berimbang dan disusun sedemikian rupa untuk mendapatkan jumlah kutub magnet serupa sebagai lilitan medan yang ada pada rotor. Medan yang membutuhkan daya yang relatif kecil untuk pembangkitan listrik ditempatkan pada rotor. Rotor dilengkapi dengan lilitan sirkuit pendek yang lebih banyak dan dikenal sebagai damper windings atau lilitan peredam.

Rotor digerakkan oleh penggerak utama dengan kecepatan konstan dan sirkuit medan dibandingkan oleh arus searah. Eksitasi disuplai melalui slip rings dengan bantuan generator DC yang disebut exciter, yang dipasang pada poros yang sama dengan rotor pada mesin sinkron. Akan tetapi, sistem pembangkitan modern biasanya menggunakan generator DC dengan rektifikasi putar dan dikenal sebagai brushless excitation (eksitasi tanpa singkat). Sistem eksitasi generator menjaga tegangan generator dan mengontrol daya reaktif. Flux ini akan memotong-motong kumparan stator, sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik (GGL) karena pengaruh induksi dari

flux tersebut. Gaya gerak listrik (GGL) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor.

Jenis rotor utama memiliki lilitan terpusat pada kutub dan celah udara yang berbeda. Rotor ini memiliki jumlah kutub yang relatif banyak, poros pendek dan diameter besar. Sirkuit ekivalen dari generator sinkron dapat dilihat pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Sirkuit Ekivalen dari Generator Sinkron

$$\begin{aligned} \text{Didapat persamaan umum: } E_a &= V_t + (R_a + jX_s)I_a \\ &= V_t + (R_a + j(X_l + X_a))I_a \end{aligned}$$

Keterangan gambar:  $I_f$  = Arus kumparan medan atau arus penguat

$R_f$  = Hambatan kumparan medan

$R_a$  = Hambatan armatur

$X_s$  = Reaktansi sinkron =  $X_l + X_a$

$X_l$  = Reaktansi leakage

$X_a$  = Reaktansi armatur

$V_t$  = Tegangan output

$E_a$  = Gaya gerak listrik armatur

### 2.1.3 Generator Sinkron Tiga Fasa

Generator sinkron tiga fasa dua kutub digambarkan pada gambar 2.4. Stator tersirui dari tiga kumparan,  $aa'$ ,  $bb'$ ,  $cc'$  yang masing-masing dapat saling ditukar hingga  $120^\circ$  listrik.

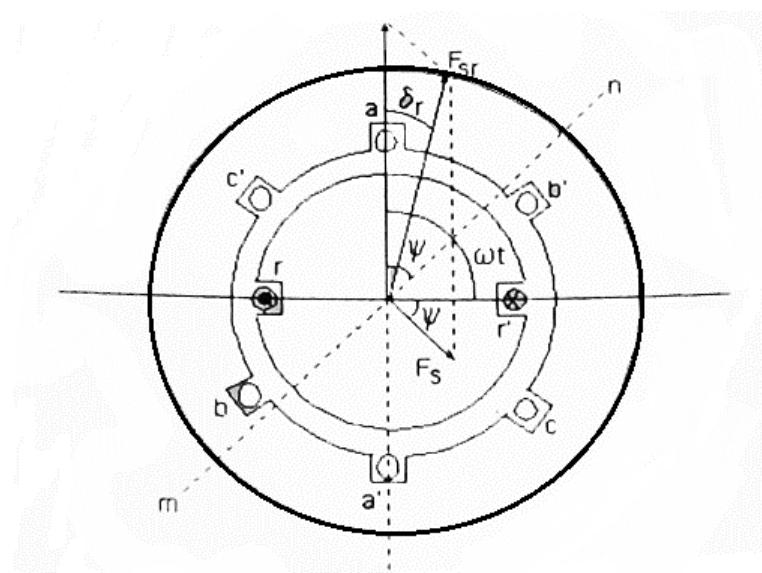
Kumparan jarak penuh (full-pitch coil) yang ditunjukkan disini bisa dianggap mewakili lilitan distribusi yang menghasilkan gelombang sinusoidal

mmf yang terpusat pada poros magnetis fasa khusus. Bila rotor dibangkitkan untuk menghasilkan fluks celah udara sebesar  $\Phi$  per kutub dan berputar dengan kecepatan sudut konstan  $\omega$ , maka hubungan fluksi kumparan berbeda pada posisi rotor sumbu mmf  $\omega t$ , dimana  $\omega t$  diukur dalam radian listrik dari sumbu magnet kumparan  $aa'$ .

Hubungan fluksi untuk kumparan  $aa'$  terpusat pada putaran  $N$  akan menjaga maksimum ( $N\Phi$ ) pada  $\omega t = 0$  dan nol pada  $\omega t = \pi/2$ . Dengan mengasumsikan lilitan distribusi, hubungan fluksi  $\lambda_a$  akan berbeda sesuai dengan cosinus sudut  $\omega t$ . Jadi, hubungan fluksi kumparan  $a$  adalah  $\lambda_a = N\Phi \cos \omega t$ .

Tegangan diinduksi di dalam kumparan  $aa'$  berdasarkan Hukum Faraday, yaitu  $e_a = -\frac{d\lambda}{dt} = \omega N \Phi \sin \omega t$

$$= E_{\max} \sin \omega t$$

$$= E_{\max} \cos (\omega t - \pi/2)$$


Gambar 2.4 Generator Sinkron Tiga Fasa Dua Kutub

Karena persamaan ini merupakan persamaan gelombang sinusoidal, maka nilai rata-ratanya adalah 0,636 kali. Nilai maksimum diperoleh jika  $\cos \omega t = 1$ .

$$E_{\max} = \omega t N\Phi = 2\pi f N\Phi$$

$$E_{\text{rata-rata}} = 0,636 (2\pi f N\Phi) = 4 f N\Phi$$

Sehingga nilai tegangan rms yang dibangkitkan adalah  $E_{rms} = 1,11(4 f N\Phi)$

Maka didapatkan  $E_a = 4,44 f N\Phi = 4,44 K_d f N\Phi$

Dimana:  $E_a$  = Gaya gerak listrik armature per fasa (volt)

$f = P n / 120$ ,  $f$  adalah frekuensi output generator ( hertz)

$K_d$  = Faktor distribusi memiliki nilai antara 0,85 – 0,95

$N$  = Jumlah kumparan per fasa =  $Z/2$

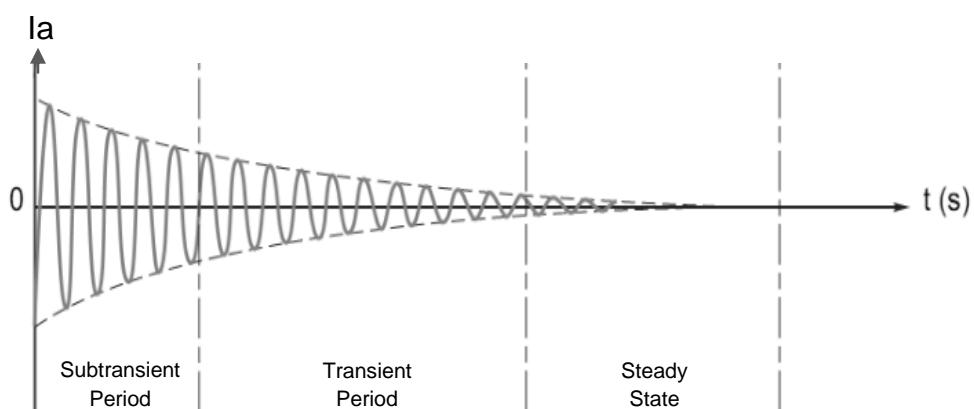
$Z$  = Jumlah konduktor seluruh slot per fasa

$\Phi$  = Flux magnit per kutub per fasa

#### 2.1.4 Gangguan Arus Hubung Singkat

Gangguan dalam sistem tenaga listrik merupakan hal yang tidak bisa dihindarkan. Gangguan sebagian besar merupakan hubung singkat dan mengakibatkan arus hubung singkat yang besarnya pada umumnya lebih besar dibandingkan arus nominal peralatan yang mengalami gangguan. Sistem tenaga listrik selalu berkembang seirama dengan perkembangan beban. Perkembangan ini mempengaruhi besarnya arus hubung singkat arus gangguan pada setiap bagian dalam sistem.

Gangguan merupakan hubung singkat yang terjadi secara tiba-tiba. Oleh karenanya diperlukan perhitungan nilai arus hubung singkat diberbagai tempat dalam sistem untuk mendapatkan gambaran mengenai situasi arus hubung singkat dalam sistem, khususnya dalam kaitannya dengan penyetelan alat-alat pengaman atau rele.



Gambar 2.5 Arus Hubung Singkat Transient Generator Sinkron

Misalkan ada sebuah generator sinkron 3 fasa yang bergerak dengan kecepatan sinkron dan menghasilkan arus medan konstan. Tiba-tiba ketiga fasa mengalami hubung singkat atau short circuit. Hubung singkat tiga fasa terjadi pada terminal stator. Arus angker hubung singkat simetris dapat dilihat pada Gambar 2.5 pada siklus pertama arus jauh lebih besar dibandingkan beberapa siklus selanjutnya (frekuensi arus bolak-balik yang terlihat adalah 50 Hz). Bentuk gelombang yang dihasilkan seimbang, artinya tidak simetris sekitar poros waktu. Pengaruh terakhir diprediksikan terhadap hubungan R-L.

Pada siklus pertama ini arus  $I_a$  menurun secara drastis, dikenal sebagai subtransient period. Selama beberapa siklus berikutnya, arus menurun agak lambat dan batasan ini disebut transient period. Akhirnya arus mencapai nilai tetap. Arus ini masing-masing dibatasi oleh reaktansi subtransient  $x''a$ , reaktansi transient  $x'a$  dan reaktansi sinkron  $xd$  atau  $xs$ . Reaktansi subtransient pada dasarnya disebabkan oleh adanya hambatan redam, reaktansi transient menunjukkan lilitan medan, reaktansi sinkron merupakan reaktansi akibat lilitan angker. Sesuai dengan rumus:

$$I_a = \pm V_o \left[ \left( \frac{1}{x''d} - \frac{1}{x'd} \right) e^{-\frac{t}{\tau''d}} + \left( \frac{1}{x'd} - \frac{1}{xd} \right) e^{-\frac{t}{\tau'd}} + \frac{1}{xd} \right]$$

Dimana :  $\tau''d$  = Subtransient waktu konstan

$\tau'd$  = Transient waktu konstan

$V_o$  = Tegangan fasa angker hubungan terbuka

### 2.1.5 Frekuensi dan Putaran

Banyak gelombang yang terbentuk setiap detik yang biasanya disebut frekuensi sedangkan waktu yang diperlukan untuk terbentuknya satu gelombang disebut periode. Umumnya frekuensi listrik yang dihasilkan suatu generator untuk tenaga adalah 50 Hz khususnya PLN.

Untuk generator yang mempunyai 2 kutub, apabila kumparan terletak antara kutub magnet  $p = 2$ , maka dalam 1 putaran akan terbentuk 1 gelombang atau sama dengan 1 periode = 1 putaran. Demikian pula seterusnya bila kutub

magnet bertambah maka berarti untuk setiap satu putaran akan terbentuk gelombang listrik yang lebih banyak, sehingga diperoleh hubungan yaitu:

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \text{ Hz}$$

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \text{ ppm}$$

Dimana:  $f$  = frekuensi listrik

$p$  = banyak kutub magnet

$n$  = putaran generator per menit

Tabel 2.1 Jumlah Putaran dan Kutub untuk Frekuensi 50 Hz

| Banyaknya Kutub (P) | 2    | 4    | 6    | 12  | 14  | 16  | 18  | 20  |
|---------------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Putaran (rpm)       | 3000 | 1500 | 1000 | 500 | 428 | 375 | 333 | 273 |

## 2.1.6 Bagian-bagian Generator yang Diamankan

### 2.1.6.1 Belitan Stator

#### 1. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Jenis gangguan tiga fasa simetris merupakan gangguan yang paling berbahaya bagi generator, karena besarnya arus hubung singkat yang terjadi dalam belitan ini dapat menimbulkan pemanasan lebih, yang dapat menimbulkan kebakaran mesin. Arus hubung singkat yang terjadi dibatasi oleh besarnya GGL dan reaktansi generator. Bentuk arus hubung singkat yang terjadi ini diperlihatkan pada gambar 2.5.

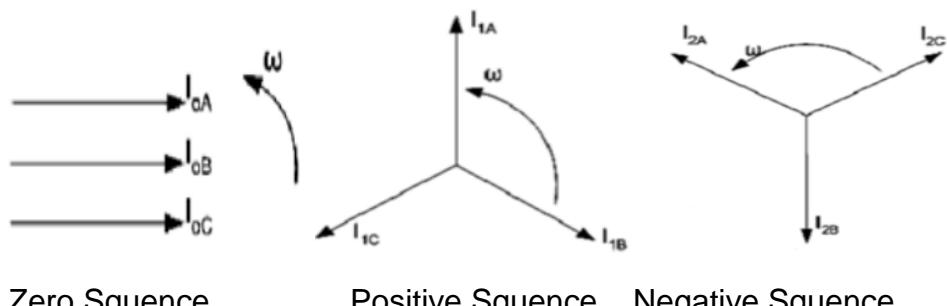
Dari bentuk arus hubung singkat diatas dapat diketahui bahwa generator sinkron memiliki 3 macam reaktansi, yaitu:

a. Reaktansi Sub Peralihan ( $X''$ ), yang berpengaruh pada saat terjadinya hubung singkat. Arus hubung singkat yang dipengaruhi oleh reaktansi sub peralihan ini mengalir hanya beberapa detik saja,

yang besarnya adalah  $I''=E/X''$ . Arus ini dikenal dengan arus sub peralihan.

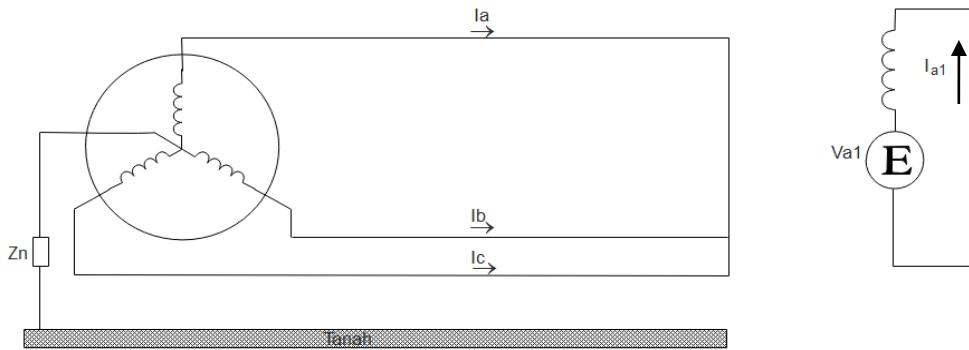
- b. Reaktansi Peralihan ( $X'$ ), yang mempengaruhi besarnya arus hubung singkat selama periode peralihan. Reaktansi ini lebih besar dari harga reaktansi sub peralihan, sehingga arus hubung singkat peralihan lebih kecil dari arus hubung singkat peralihan ( $I'=E/X'$ ).
- c. Reaktansi Sinkron ( $X$ ), yang mempengaruhi arus hubung singkat dalam keadaan lunak atau steady state. Untuk menghitung arus hubung singkat yang terjadi pada suatu generator, digunakan suatu metode yang dikenal dengan Teori Komponen Simetris. Dimana dalam teori ini besaran arus dan tegangan fasa dinyatakan dalam besaran-besaran vektor komponen urutan positif, urutan negatif dan urutan nol.

Untuk gangguan hubung singkat fasa simetris, besar arus hubung singkat yang mengalir di setiap fasa adalah sama dengan urutan positif  $I_{a1}$ . Dalam kondisi simetris (seimbang), komponen-komponen vektor urutan negatif dan nol tidak ada.



Gambar 2.6 Vektor Komponen Simetris

$$\begin{array}{ll}
 V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} & ; I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\
 V_b = a^2 \cdot V_{a1} + a \cdot V_{a2} + V_{a0} & ; I_b = a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2} + I_{a0} \\
 V_c = a \cdot V_{a1} + a^2 \cdot V_{a2} + V_{a0} & ; I_c = a \cdot I_{a1} + a^2 \cdot I_{a2} + I_{a0}
 \end{array}$$



Gambar 2.7 Hubungan Singkat Tiga Fasa pada Terminal Generator

$$I_a = I_b = I_c = I_a \cdot 1 = \frac{E}{Z_1}$$

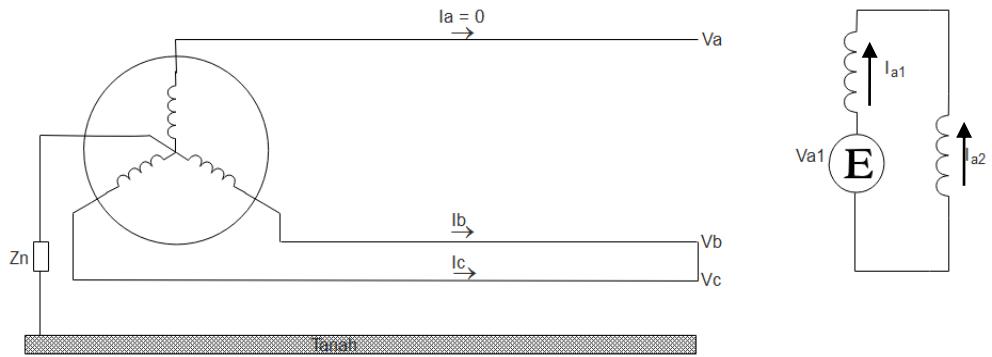
Dimana:  $E$  = GGL generator

$Z_1$  = Impedansi generator urutan positif

Untuk perhitungan arus hubung singkat besaran tahanan  $R$  suatu mesin biasanya diabaikan. Sehingga untuk mesin sinkron, impedansi urutan positifnya adalah reaktansi sub peralihan ( $X''$ ), reaktansi peralihan ( $X'$ ) dan reaktansi sinkron keadaan tunak ( $X$ ), tergantung pada saat mana perhitungan hubung singkat tersebut diperlukan. Untuk pemakaian rele pengaman biasanya digunakan reaktansi sub peralihan ( $X''$ ).

## 2. Hubung Singkat Fasa ke Fasa

Dengan menggunakan teori komponen simetris, gangguan hubung singkat fasa ke fasa suatu generator yang di tanahkan melalui impedansi  $Z_n$ , hubungan jala-jala urutan untuk tiap-tiap komponen adalah paralel. Dalam hal ini komponen arus urutan nol tidak ada, karena pada tempat gangguan tidak terdapat hubung singkat ke tanah.



Gambar 2.8 Hubung Singkat Fasa ke Fasa

Dengan rangkaian listrik biasa besar vektor arus urutan positif dan negatif dapat dihitung sebagai berikut;

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2}$$

Jadi besar arus gangguan hubung singkat fasa-fasa adalah:

$$I_b = -I_c \quad ; I_a = 0$$

$$I_b = a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2} + I_{a0} ; I_{a0} = 0$$

$$I_b = -I \frac{\sqrt{3} \times E_a}{Z_1 + Z_2}$$

Jadi besar tegangan yang terjadi dalam gangguan ini adalah:

$$V_{a1} = V_{a2} = -I_{a1} Z_2 \quad ; V_{a0} = 0$$

$$V_{a1} = -\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} E_a$$

Jadi besar tegangan masing-masing fasa adalah sebagai berikut:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_a = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} E_a$$

$$V_b = V_c$$

$$= a \cdot V_{a1} + a^2 \cdot V_{a2} + V_{a0}$$

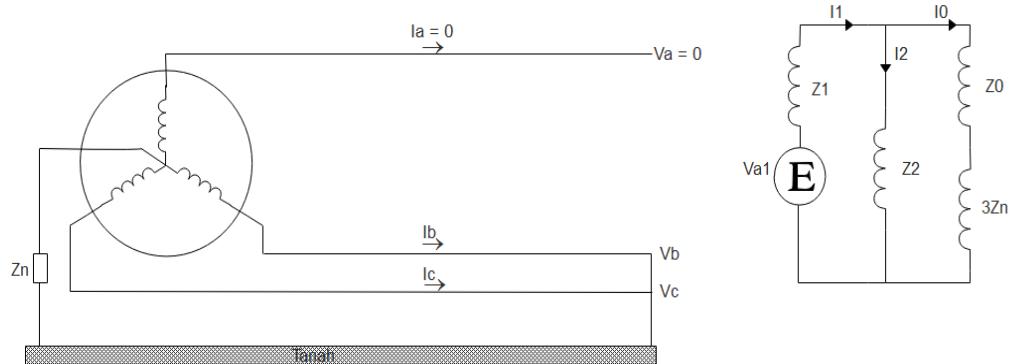
$$= (a^2 + a) V_{a1}$$

$$V_c = (a^2 + a) \frac{Z_2 \cdot E_a}{Z_1 + Z_2}$$

$$V_c = -\frac{Z_2 \cdot E_a}{Z_1 + Z_2}$$

### 3. Hubung Singkat Fasa-fasa ke Bumi

Dengan menggunakan teori komponen simetris didapat bahwa gangguan hubung singkat fasa-fasa ke bumi, ketiga jala-jala urutan terhubung paralel sebagai berikut:



Gambar 2.9 Hubung Singkat Fasa-fasa ke Bumi

Dari rangkaian diatas dapat ditentukan besar arus urutan positif  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  serta  $I_{a0}$  sebagai berikut:

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a3} \text{ (Hubungan Paralel)}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0' + 3Z_n)}{Z_2 + Z_0' + 3Z_n}} ; \text{ Bila } Z_0 = Z_0' + 3Z_n$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2Z_0'}{Z_2 + Z_0'}}$$

$$I_{a1} = \frac{Z_2 + Z_0}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0} \cdot E_a$$

$$I_{a1} = -I_{a2} - I_{a0}$$

$$I_{a2} = \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \cdot I_{a1}$$

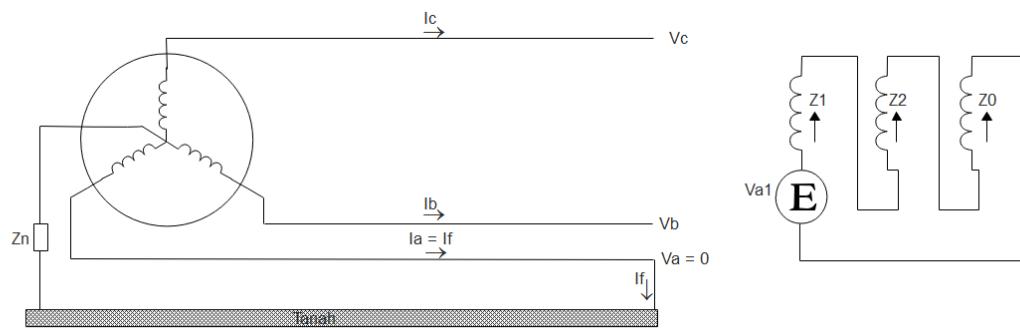
$$I_{a2} = \frac{Z_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0} \cdot E_a$$

$$I_{a0} = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} \cdot I_{a1}$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0$$

#### 4. Hubung Singkat Fasa ke Bumi

Gangguan inilah yang mungkin terjadi dalam suatu mesin karena adanya kerusakan isolasi sehingga terjadi hubung singkat antar kawat fasa ke badan (ground). Dengan menggunakan teori komponen simetris pada gangguan hubung singkat ke bumi ini ketiga jala-jala urutan terhubung seri sebagai berikut



Gambar 2.10 Hubung Singkat Fasa ke Bumi

Dari rangkaian diatas dengan mudah dihitung ketiga arus urutan jala-jala sebagai berikut:  $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$  (Hubung Seri)

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Besar arus gangguan:  $I_f = I_a$

$$I_f = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_f = 3 \cdot I_{a1} = 3 \cdot I_{a2} = 3 \cdot I_{a0}$$

$$I_f = \frac{3 \cdot E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Kemudian dihitung besar tegangan dari masing-masing komponen simetris sebagai berikut:

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} \cdot Z_1$$

$$V_{a1} = E_a - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0} E_a$$

$$V_{a1} = \frac{Z_2 + Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0} E_a$$

$$V_{a0} = -I_{a0} \cdot Z_0$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = -\frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$V_{a2} = -I_{a2} \cdot Z_2$$

$$V_{a2} = -\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_0} E_a$$

Dari ketiga komponen simetris ini maka besar tegangan masing-masing fasa dapat ditentukan sebagai berikut:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = a^2 \cdot V_{a1} + a \cdot V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_c = a \cdot V_{a1} + a^2 \cdot V_{a2} + V_{a0}$$

## 5. Kondisi Tidak Seimbang

Pada saat sistem mengalami gangguan hubung singkat tidak simetris, berdasarkan teori komponen simetris arus mengalir dalam sistem terdiri dari tiga komponen urutan simetris, yaitu:

- a. Arus urutan positif  $I_1$
- b. Arus urutan negatif  $I_2$
- c. Arus urutan nol  $I_0$

Arus urutan negatif merupakan arus yang dihasilkan oleh suatu sistem 3 fasa yang arah putar fasornya berlawanan dengan arah perputaran fasor sistem urutan positif. Sedangkan arus urutan nol adalah komponen arus yang bukan berupa sistem tiga fasa. Ketiga arus nol memiliki fasa yang sama. Sehingga arus urutan nol pada mesin tidak ditransposisi akan terjadi ketidaksimetrisan yang kemudian timbul arus urutan negatif. Besarnya arus urutan negatif tergantung pada konfigurasi dan besarnya sistem.

### 2.1.6.2 Belitan Rotor

#### 1. Pemanasan pada Belitan Rotor oleh Arus Urutan Negatif

Arus urutan negatif yang timbul akibat adanya ketidakseimbangan sistem akan meimbulkan suatu medan utar pada stator yang arah perputarannya berlawanan terhadap perputaran rotor dengan kecepatan  $n = \frac{120 \cdot f}{p}$ . Gelombang putar arus urutan negatif ini akan

menginduksikan arus pusar pada bagian-bagian logam di rotor dengan frekuensi 2 kali frekuensi sistem. Sedangkan arus urutan negatif tidak menginduksikan arus pusar pada rotor, karena medan putarnya berputar dengan arah dan kecepatan yang sama terhadap rotor. Demikian pula arus urutan nol pada stator tidak menginduksikan arus pusar di rotor karena komponen arus urutan nol ini bukan merupakan sistem tiga fasa yang dapat menimbulkan medan putar urutan nol. Arus rotor yang disebabkan oleh induksi arus urutan negatif tidak hanya mengalir dalam batang-batang peredam seperti halnya pada mesin induksi rotor sangkar, akan tetapi mengalir pada permukaan inti rotor, dinding alur rotor, belitan medan dan pasak alur (wedges).

Medan magnet urutan negatif berputar berlawanan putaran rotor menimbulkan gelombang listrik induksi dipermukaan rotor yang kemudian merambat ke inti rotor. Hal ini menyebabkan terjadinya pemanasan dipermukaan rotor oleh induksi arus urutan negatif, terjadi ketidakseimbangan sistem.

## 2. Pemanasan Rotor oleh Induksi Eddy Current

Generator yang berputar tidak sinkron pada harga slip (s) tertentu, seperti halnya pada teori mesin induksi maka rotor akan terinduksi arus Eddy Current. Arus eddy current ini akan bersirkulasi di ring penahan belitan medan, rangkaian medan, batang-batang belitan peredam, inti rotor dan pasak-pasak penahan belitan medan (wedges).

Arus-arus induksi berpulsasi dengan frekuensi sebanding dengan harga slip yang terjadi yaitu:  $f_2 = sf_1$

$$S = \text{Slip}$$

$$Sf_1 = \text{Frekuensi jala-jala (stator)}$$

Sebagaimana telah diterangkan sebelumnya bahwa gelombang medan magnet listrik yang diinduksikan oleh medan magnet dipermukaan rotor akan merambat sampai pada suatu kedalaman  $\delta$  tertentu di rotor.

### 3. Belitan Rotor Hubung Singkat ke Bumi

Gangguan hubung singkat tunggal rotor ke bumi (badan rotor) tidak akan membahayakan generator, sebab belitan tidak dibumikan, akan tetapi hal ini akan memperbesar kemungkinan terjadinya hubung singkat di lokasi akibat tegangan induksi dalam medan oleh transient stator. Hubung singkat ini akan memotong arus ditempat gangguan, sehingga sebagian belitan medan seakan-akan terhubung singkat dan terjadi ketidakseimbangan fluksi terkonsentrasi pada satu kutub yang lain, kerapatan fluksi ini berkurang. Akibatnya akan terjadi ketidakseimbangan gaya-gaya yang kemudian dapat menimbulkan getaran kuat pada rotor. Getaran ini dapat merusak bantalan-bantalan dan peralatan lainnya.

## 2.2 Pengertian dan Fungsi Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Sistem Proteksi tenaga listrik adalah sistem proteksi yang dipasang pada peralatan-peralatan listrik suatu sistem tenaga listrik seperti generator terhadap kondisi abnormal operasi sistem itu sendiri. Kondisi abnormal itu dapat berupa antara lain : hubung singkat, tegangan lebih, beban lebih dan lain-lain. Dengan kata lain sistem proteksi itu bermanfaat untuk :

1. Menghindari ataupun untuk mengurangi kerusakan peralatan-peralatan akibat gangguan ( kondisi abnormal operasi sistem). Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan maka akan semakin sedikit pengaruh gangguan kepada kemungkinan kerusakan alat.
2. Cepat melokalisir luas daerah yang mengalami gangguan menjadi sekecil mungkin.
3. Dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen dan juga mutu listrik yang baik.
4. Mengamankan manusia terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

Pengetahuan mengenai arus-arus yang timbul dari berbagai tipe gangguan pada suatu lokasi merupakan hal yang sangat penting. Jika terjadi gangguan pada sistem, para operator yang merasakan adanya gangguan tersebut diharapkan segera dapat mengoperasikan circuit-circuit breaker yang tepat

untuk memisahkan pembangkit dan jaringan yang terganggu. Sangat sulit bagi seorang operator untuk mengawasi gangguan-gangguan yang mungkin terjadi dan menentukan CB mana yang dioperasikan untuk mengisolir gangguan tersebut secara manual.

Mengingat arus gangguan yang cukup besar, maka perlu secepat mungkin dilakukan proteksi. Hal ini perlu suatu peralatan yang digunakan untuk mendeteksi keadaan-keadaan yang tidak normal tersebut dan selanjutnya menginstruksikan circuit breaker yang tepat untuk bekerja memutuskan rangkaian atau sistem yang terganggu. Dan peralatan tersebut kita kenal rele.

### **2.3 Sifat-sifat Dasar Sistem Proteksi**

Dalam pemasangan alat-alat pada suatu peralatan listrik perlu diperhatikan persyaratan-persyaratan sebagai berikut :

- 1. Selektif**

Rele pengaman harus dapat membedakan / merasakan kondisi perubahan dalam suatu jaringan. Jadi dalam hal ini rele proteksi harus cepat beraksi terhadap keadaan yang tidak normal dan mendeteksi dengan cepat daerah mana yang mengalami gangguan dan kemudian mengoperasikan CB untuk trip pada daerah yang mengalami gangguan.

- 2. Sensitif**

Rele pengaman harus sensitif, artinya rele harus peka terhadap setiap gangguan, sehingga dapat bekerja dengan tepat atau memberikan reaksi bila terjadi perubahan dari kondisi normal ke kondisi abnormal. Jadi sistem proteksi ini harus cepat mendeteksi dan bekerja ketika terjadi kondisi abnormal.

- 3. Cepat**

Rele proteksi harus mampu memutuskan bagian yang terganggu secepat mungkin. Mengingat jika rele proteksi mampu bekerja dengan cepat maka akan dicapai beberapa hal penting antara lain:

- Mempercepat tercapainya kestabilan sistem
- Mengurangi kemungkinan bahaya kerusakan
- Memperkecil timbulnya gangguan pada konsumen

- d. Mengurangi kemungkinan timbulnya gangguan lain akibat gangguan yang sedang terjadi
4. Ekonomis
- Faktor ekonomis memegang peranan penting. Terlalu banyak proteksi pada sistem tenaga listrik adalah sama buruknya dengan terlalu sedikit sistem proteksi. Oleh karena itu harus dipilih proteksi secukupnya dengan efisiensi tinggi.
5. Keandalan

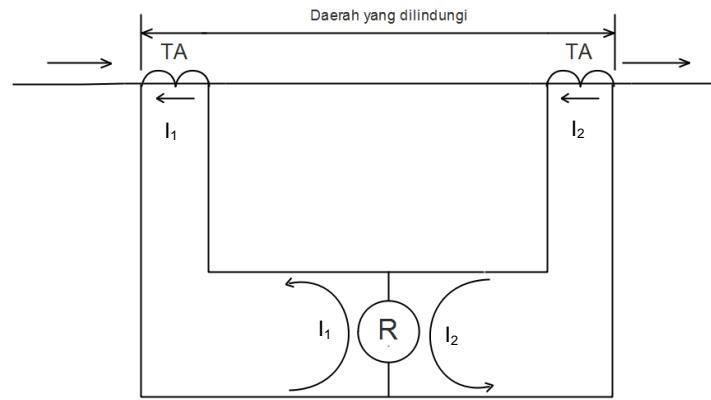
Keandalan disini adalah bahwa suatu rele proteksi harus siap bekerja, andal dan tepat dalam operaasinya disetiap saat dan setiap jenis gangguan pada sistem tenaga yang diproteksi. Rele proteksi pada umumnya lebih banyak berada dalam keadaan tidak bekerja. Kadang-kadang beberapa kali saja dalam setahun, itupun jika ada gangguan yang berarti. Oleh karena itu agar tetap menjamin keandalanya, pada waktu harus diadakannya pengujian-pengujian kembali sehingga pada saat dibutuhkan nantinya dapat bekerja sesuai yang diharapkan.

Beberapa faktor penting yang mempengaruhi keandalan suatu sistem proteksi antara lain adalah kualitas yang baik dan rele proteksinya, kesederhanaan konstruksi , serta ketetapan perancangannya. Pada umumnya suatu sistem proteksi, makin sedikit rele proteksi dan kontak-kontaknya, maka makin andal sistem proteksi tersebut.

## 2.4 Rele Differensial

### 2.4.1 Pengertian dan Prinsip Kerja Rele Differensial

Prinsip kerja rele differensial tergantung pada adanya perbedaan arus yang masuk dan yang keluar dan bagian yang dilindungi, yaitu perbedaan arus dari dua buah trafo arus yang masuk ke rele. Pada rele differensial, diperlukan dua trafo arus yang dipasang di kedua sisinya, yaitu sisi masuk dan sisi keluar dan bagian yang dilindungi lihat gambar 2.11



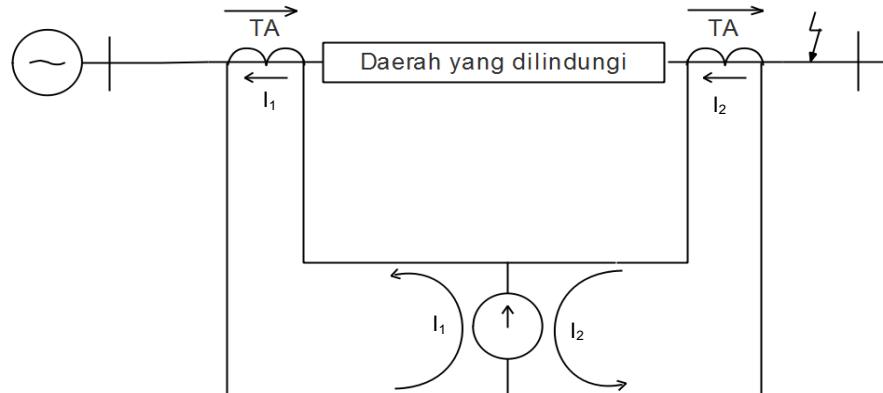
Gambar 2.11 Prinsip Kerja Rele Differensial yang Didasarkan pada Perbedaan Arus Sirkulasi

Rele R merupakan komparator sederhana yang membandingkan besaran arus, di kedua ujung dari daerah yang dilindungi.

#### 2.4.2 Gangguan-gangguan

##### 1. Gangguan di Luar Daerah yang Dilindungi

Untuk gangguan di luar daerah yang dilindungi dengan sumber satu arah, lihat gambar 2.12



Gambar 2.12 Gangguan Diluar Daerah yang Dilindungi dengan Sumber Satu Arah

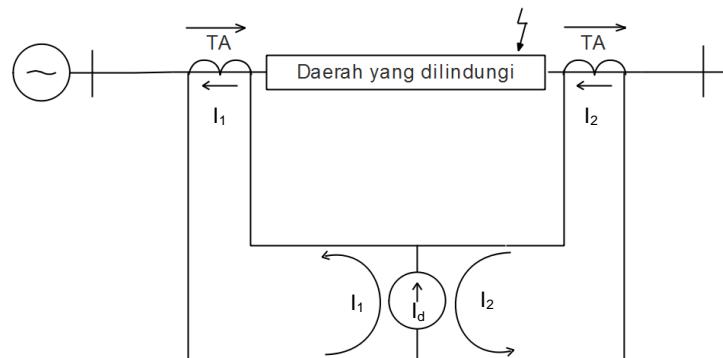
$$i_1 = i_2$$

$$i_d = i_1 - i_2 = 0$$

Jadi rele tidak bekerja

## 2. Gangguan di Dalam Daerah yang Dilindungi

Untuk gangguan di dalam daerah yang dilindungi dengan sumber satu arah, lihat gambar 2.13



Gambar 2.13 Gangguan di Dalam Daerah yang Dilindungi dengan Sumber Satu Arah

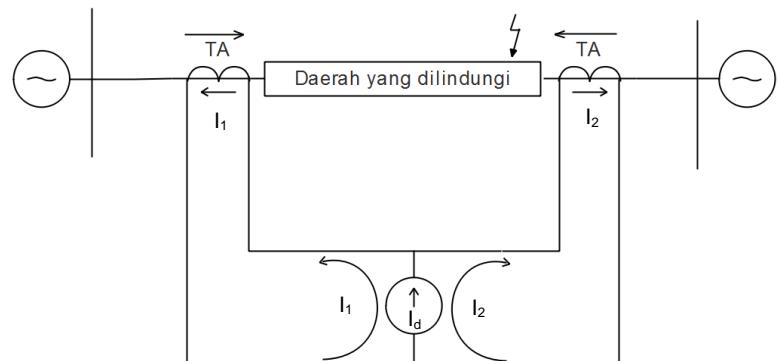
$$i_i = i_1$$

$$i_2 = i_2 = 0$$

$$i_d = i_1 - i_2 = i_1. \text{ Jadi rele bekerja.}$$

## 3. Gangguan di Dalam Daerah yang Dilindungi dengan Sumber Dua Arah

Untuk gangguan di dalam daerah yang dilindungi dengan sumber dua arah, lihat gambar 2.14



Gambar 2.14 Gangguan di Dalam Daerah yang Dilindungi dengan Sumber Dua Arah

$$i_1 = i_1$$

$$i_2 = i_2$$

$$i_d = i_1 + i_2$$

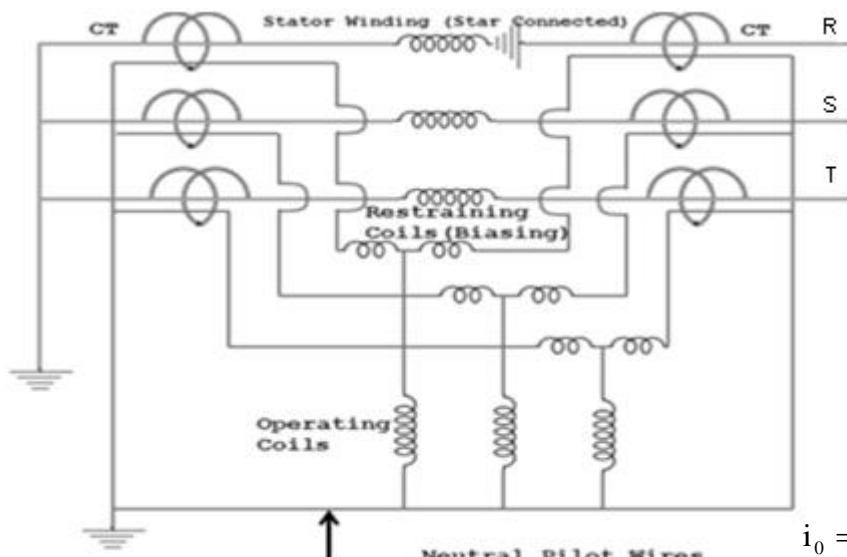
Jadi rele bekerja.

#### 2.4.3 Rele Differensial Presentase

Walaupun trafo arus identik, bila beban sekunder maing-masing trafo arus tidak sama, maka akan terjadi kejemuhan yang tidak sama. Beban yang tidak sama disebabkan oleh beberapa hal, yaitu:

1. Rele atau belitan kerja rele tidak terpasang pada titik equipotensial dan kawat penghubungnya.
2. Pada kawat penghubung terdapat sambungan ke alat lainnya.

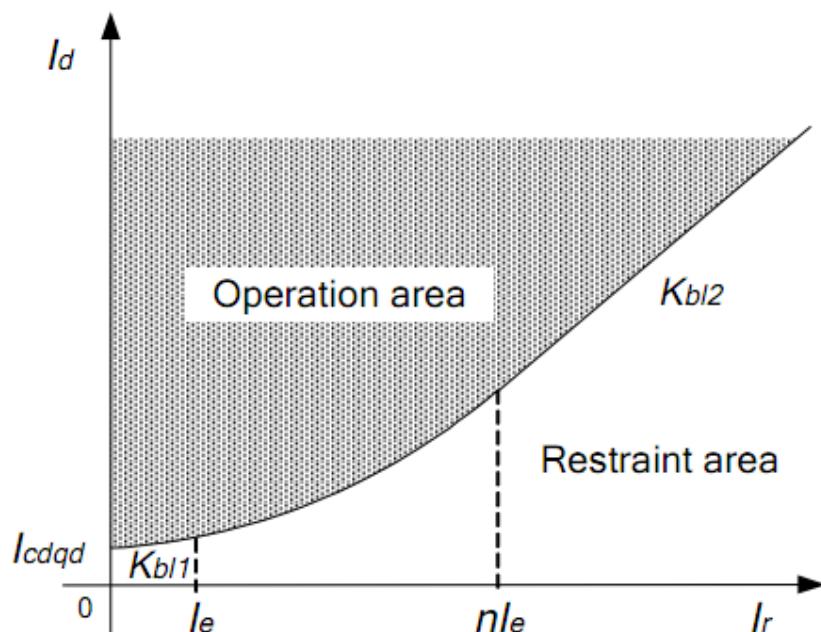
Untuk mengatasi hal ini dapat ditempuh dengan rele differensial bias. Pada rele differensial bias terdapat dua kumparan penahan yang dialiri arus yang akan membangkitkan kopel penahan. Bagan hubungan dari rele differensial bias atau rele differensial prosentase dapat terlihat pada gambar 2.15 arus yang mengalir pada kumparan kerja rele adalah  $i_1 - i_2$  dan arus yang mengalir pada kumparan penahan adalah  $\frac{i_1 + i_2}{2}$  dimana kedua kumparan penahan tersebut identik. Gaya yang bekerja rele adalah



$i_0$  = Arus operating  
 $i_R$  = Arus restraint

Gambar 2.15 Rele Differensial Persentase ( Bias )

Pada keadaan rele tidak bekerja, gaya (kopel) kerja sama dengan gaya kopel penahan. Jadi, karakteristiknya mempunyai kecuraman yang ditentukan oleh perbandingan  $\frac{N_p}{N_k}$  atau untuk rele tertentu nilainya konstan per unit bias dan didefinisikan sebagai perbedaan arus dibagi dengan sirkulasi arus rata-rata dan perbandingannya konstan untuk semua besaran arus. Lihat gambar 2.16



Gambar 2.16 Karakteristik Operasi dari Rele Differensial Presentase

#### 2.4.4 Keuntungan dan Kerugian Rele Differensial

1. Keuntungan pengaman differensial :
  - a. Pengaman sangat selektif
  - b. Cepat, tidak perlu waktu tunda
2. Kerugian Pengaman Differensial :
  - a. Tidak memberikan pengaman cadangan pada seksi-seksi yang berdekatan.
  - b. Memerlukan kawat penghubung untuk kedua trafo arus tersebut . Ini membatasi penggunaan pada peralatan seperti generator, transformator daya, motor dan pada saluran transmisi dengan panjang tertentu.
  - c. Batas daerah pengaman tertentu.

#### 2.4.5 Gangguan-gangguan yang Menyebabkan Rele Differensial Bekerja

1. Kerusakan lilitan stator generator kerena sambaran petir.

2. Kerusakan lilitan stator generator karena adanya bagian dari rotor yang lepas dan menghantam lilitan stator.
3. Hubung singkat lilitan stator generator karena minyak pelumas atau air pendingin dari mesin penggerak bocor dan mengenai lilitan stator.
4. Adanya binatang yang mengenai terminal lilitan stator generator.
5. Ujung-ujung kumparan stator terkena tekanan mekanis sehingga isolasinya rusak dan timbul hubung singkat antar lilitan stator.

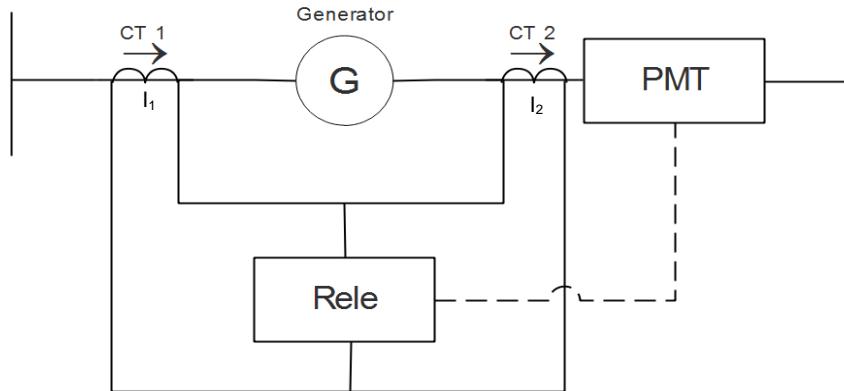
#### **2.4.6 Kesulitan Rele Differensial**

1. Selisih panjang kawat penghantar. Transformator dan mesin saat ini harus dilindungi terletak di lokasi yang berbeda dan biasanya bukan tidak mungkin untuk menghubungkan kumparan rele ke poin ekuitensial. Kesulitan diatas dengan menghubungkan tahanan secara seri dengan penghantar.
2. CT rasio kesalahan selama hubung singkat. Arus CT biasanya memiliki rasio yang hamper sama dengan arus nominal. Tetapi selama kondisi hubung singkat, arus utama terlalu besar. Rasio kesalahan dari kedua CT berbeda selama kondisi ini karena magnet, kondisi saturasi dan sebagainya.
3. Kejemuhan CT megneting sirkuit selama kondisi hubung singkat. Karena ini dapat menyebabkan rele beroperasi.

#### **2.4.7 Proteksi Differensial untuk Generator**

Sistem pengaman differensial pada generator berfungsi untuk mengamankan apabila terjadi gangguan hubung singkat di dalam generator. Pemasangan Transformator arus (CT) terletak pada sisi switchgear dan sis  
si titik netral generator. Dengan demikian bagian yang diamankan adalah kumparan stator generator tersebut sampai dengan kedua transformator arus yang terpasang tersebut. Sehingga jika terjadi gangguan hubung singkat dalam kumparan stator tersebut atau daerah yang diamankan rele differensial bekerja, yaitu dengan membuka pemutus tenaga (PMT) serta pemutus penguat transformator.

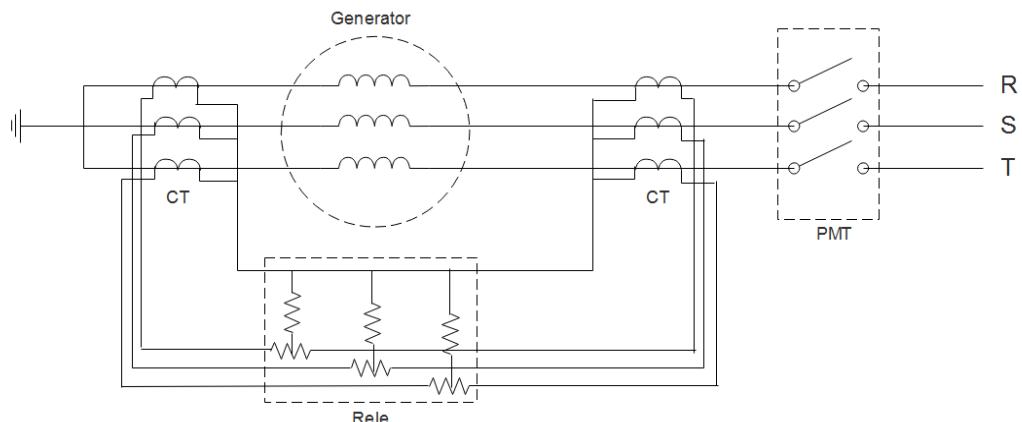
Pada Gambar 2.17 pemasangan rele differensial pada generator dan untuk mempermudah dibuat system pengaman satu fasa.



Gambar 2.17 Diagram Satu Fasa Pengaman Differensial pada Generator

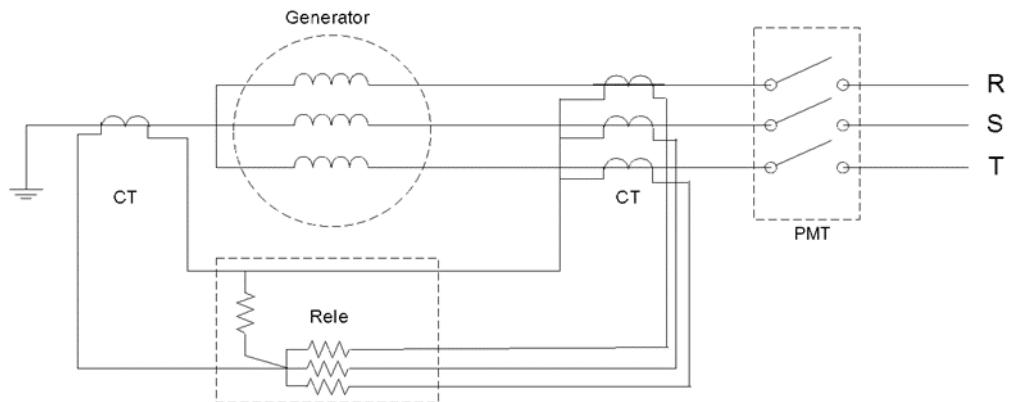
Penggunaan rele differensial dengan system ini berfungsi untuk mendeteksi gangguan didalam yang terjadi, seperti hubung singkat fasa ke fasa, fasa ke tanah dan hubung singkat antara belitan dalam fasa. Gangguan hubung singkat tersebut dapat dideteksi tergantung pada hubungan belitan kumparan stator.

Untuk belitan lilitan tunggal hubung bintang, maka bentuk susunan transformator arus dan relenya dapat dilihat pada gambar 2.18, dimana bentuk hubungan ini dapat dideteksi gangguan hubung singkat antara fasa dan fasa ke tanah.



Gambar 2.18 Hubungan Proteksi Differensial untuk Belitan Stator Generator Terhubung Singkat

Bila belitan stator generator dimana hubungannya netralnya terleletak didalam generator dan hanya kawat netral dan kawatnya fasanya saja yang keluar, maka susunan rele serta CT-nya hanya dapat mendeteksi gangguan fasa ke tanah saja. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.19 untuk bentuk umumnya.



Gambar 2.19 Proteksi Diferensial Untuk Generator Tiga Kawat di Luarnya

## 2.5 Komponen Pendukung Pengaman

Dalam menentukan sistem pengaman generator, bukan hanya menentukan jenis dan penyetelan dari rele saja, namun harus ditinjau komponen-komponen lain. Komponen lain ini merupakan hal penting dari pada perencanaan sistem tenaga.

### 2.5.1 Pemutus Tenaga

Berbagai tipe Pemutus Tenaga (PMT) digunakan pada sirkuit tenaga guna membuka dan menutup sirkuit, baik pada kondisi normal maupun abnormal. Arus nominal, tegangan pengenal dan kapasitas pemutus (MVA) dari PMT harus disesuaikan dengan beban dan daya hubung singkat pada titik tertentu pada sirkuit dimana PMT tersebut dipasang.

### **2.5.2 Transformator Arus**

Untuk mendeteksi adanya gangguan arus lebih, sebagai sensornya adalah transformator arus.

Transformator arus untuk pengukuran sedikit berbeda dengan transformator arus yang dipakai untuk pengaman, karena arus yang digunakan untuk pengaman harus mempunyai kesebandingan hingga 10-20 kali arus nominal yang diakibatkan oleh hubung singkat sistem tenaga. Pada umumnya arus nominal sekunder transformator arus adalah 5 ampere.

### **2.5.3 Transformator Tegangan**

Transformator tegangan berfungsi untuk menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah yang digunakan untuk alat-alat pengaman. Pengamanan transformator tegangan untuk pengukuran berbeda dengan transformator tegangan yang dipakai untuk pengaman. Untuk pengukuran mempunyai ketelitian pada daerah kerja tegangan 80% sampai dengan 120% dari tegangan nominal, sedangkan untuk pengaman ketelitian relatif rendah. Akan tetapi untuk daerah kerjanya dari 5% sampai 190% dari tegangan nominal.

Jenis transformator tegangan adalah

1. Transformator tegangan dengan inti besi.

Biasanya digunakan untuk tegangan rendah sampai dengan tegangan tinggi.

2. Transformator tegangan dengan kapasitor.

Transformator ini disadap pada tegangan menengah, kemudian diturunkan menjadi tegangan rendah. Tranformator ini biasa digunakan untuk tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi.